

Ermüdungsfestigkeit von Stumpfnahstößen hochfester Offshore—Feinkornbaustähle mit und ohne Nachbehandlung für den Bau von Offshore-Windenergieanlagen

Christian Dänekas, Steffen Heikebrügge, Jan Kulikowski, Elyas Ghafoori, Peter Schaumann, Bernd Breidenstein

Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele ist eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Bauweise von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) entscheidend. Da OWEA hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, spielen Ermüdungsnachweise, insbesondere an Schweißverbindungen, eine zentrale Rolle. In dieser Studie wurde daher die automatisierte Anwendung des höherfrequenten Hämmerns und Festwalzens zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit und zur wirtschaftlichen Nutzung hochfester Feinkornbaustähle untersucht. Die Untersuchungen wurden an Schweißverbindungen mit den Grundwerkstoffen S460ML und S690QL1 durchgeführt. Die Nachbehandlung erfolgte automatisiert mittels Werkzeugmaschine und Roboter. Mit Hilfe der Probencharakterisierung konnten Zusammenhänge zwischen Eigenspannungen, Nahtgeometrie und Nachbehandlungsmethoden gezeigt werden. Beide Methoden führten zu einer signifikanten Steigerung der Ermüdungsfestigkeit. Das Festwalzen erzielte im Vergleich zum höherfrequenten Hämmern, trotz geringerer Beeinflussung der Schweißnaht, die größeren Ermüdungsfestigkeiten.

Einleitung

Der European Green Deal der Europäischen Kommission vom 11. Dezember 2019 strebt an, die Netto-Treibhausgasemissionen der EU bis 2050 auf null zu reduzieren. In Deutschland ist hierfür ein massiver Ausbau der Windenergie unverzichtbar, insbesondere der Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) [2]. Die Optimierung der Bemessungs-, Fertigungs- und Installationsverfahren der OWEA-Gründungsstrukturen birgt großes Einsparpotenzial.

In den vergangenen Jahren wurden unterschiedliche Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen eingesetzt. Monopiles, die einen Marktanteil von ca. 80 % aufweisen, bestehen aus einem einzeln stehenden Stahlpfahl mit Verbindung zu einem Turm der Anlage über ein Übergangsstück. Diese Pfähle, geformt und geschweißt, werden zunehmend größer und schwerer, um den Anforderungen steigender Wassertiefen gerecht zu werden.

OWEA-Tragstrukturen unterliegen dynamischen Belastungen durch Wind, Wellen und Betrieb. Die Lebensdauer dieser Strukturen wird maßgeblich durch die Ermüdung der Schweißverbindungen bestimmt, insbesondere an kritischen Stellen wie den Schweißnahtübergängen. Hier können aufgrund örtlicher Spannungskonzentrationen und Eigenspannungszuständen Ermüdungsrisse entstehen. Hochfeste Feinkornbaustähle sind aufgrund ihrer Materialeigenschaften für ressourcenschonende und wirtschaftliche Konstruktionen geeignet. Dennoch fehlen umfassende Erkenntnisse zu Schweißnahtqualität und Ermüdungsfestigkeit dieser Stähle, besonders im Offshore-relevanten Dauerfestigkeitsbereich, der durch den Eurocode 3 nicht abgedeckt wird.

Die Effektivität von Nachbehandlungsmethoden, etwa das höherfrequente Hämmern und das Festwalzen, zur Verbesserung des Ermüdungsverhaltens von Schweißverbindungen, ist belegt, wurde jedoch vor allem bei niederfesten Stählen untersucht. Eine automatisierte Anwendung

dieser Methoden könnte die Qualitätssicherung und Effizienz in der Fertigung erheblich verbessern. Derzeit werden verschiedene Nachbehandlungsverfahren größtenteils manuell angewendet. Unterschiede zwischen manueller und automatisierter Nachbehandlung, speziell beim höherfrequenten Hämmern, sind jedoch wenig erforscht. Auch der Einfluss des Festwalzens, als relativ neues Nachbehandlungsverfahren, auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter, hochfester Stähle ist unzureichend untersucht. Das aus diesen Erkenntnissen abgeleitete Forschungsziel war die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Stumpfnahverbindungen unter Einsatz hochfester Feinkornbaustähle durch automatisierte Nachbehandlungsmethoden, welches im IGF-Vorhaben 21496 N/ P 1506 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung untersucht wurde [3].

Herstellung der Versuchskörper

In dem Forschungsprojekt wurden die hochfesten Feinkornbaustähle DIN EN 10025-4 S460ML (1.8838) und DIN EN 10025-6 S690QL1 (1.8988) untersucht. Für den Werkstoff S460ML wurden Bleche der Dicken $t = 20, 40$ und 60 mm untersucht. Für den Werkstoff S690QL1 wurden ausschließlich Bleche der Dicke $t = 20$ mm untersucht. Zur Herstellung der Prüfkörper bzw. der Schwingproben wurden die zuvor beschriebenen Walzbleche zugeschnitten und zu Stumpfnahverbindungen als „DV-Naht“ gefügt. Das Schweißen wurde im industriellen Umfeld durch die Fa. Steelwind Nordenham GmbH mit dem Unterpulver (UP)-Schweißprozess 121 nach DIN EN ISO 4063 durchgeführt, siehe Abbildung 1. Im Anschluss an die Schweißversuche wurden die Konturen der Schwingproben mittels Wasserstrahlschneiden aus den Großblechen geschnitten und die Endkontur mit Hilfe einer Fräsbearbeitung hergestellt. Untersuchungen an Probekörpern ohne applizierte Schweißnahtnachbehandlung werden der Serie AW (as welded) zugeordnet.

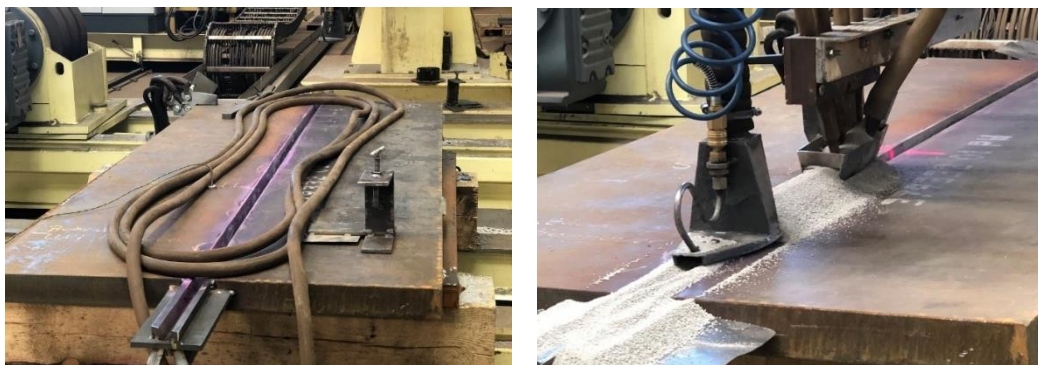
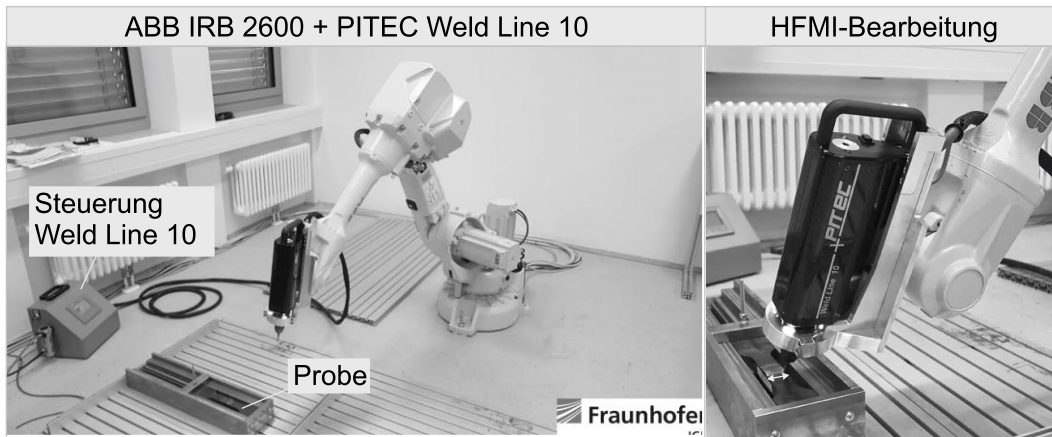


Abbildung 1: Unterpulver-Schweißen der Stahlbleche bei der Fa. Steelwind Nordenham GmbH

Die experimentellen Untersuchungen des automatisierten höherfrequenten Hämmerns wurden beim Fraunhofer IGP in Rostock durchgeführt. Die Applikation des PiTEC-Werkzeugs Weld Line 10 erfolgte geführt durch einen Industrieroboter der Fa. ABB vom Typ IRB 2600, siehe Abbildung 2. Für die Applikation im Nahtübergang wurde der Roboter initial geteached. Für die HFMI-Bearbeitung wurden Pindurchmesser von $d_{\text{Pin}} = 2,0$ und $4,0$ mm verwendet. Bei Differenzierung der Serien wird nachfolgend entsprechend PITEC2 und PITEC4 als Bezeichnung verwendet. Der Luftdruck wurde zu 7 bar gewählt. Dies resultiert in einer Pin-Frequenz von $f_{\text{Pin}} = 90$ Hz. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde zu $v_f = 5$ mm/s gewählt, wobei der Anstell- bzw. Kippwinkel konstant bei $\alpha = 22,5^\circ$ lag.



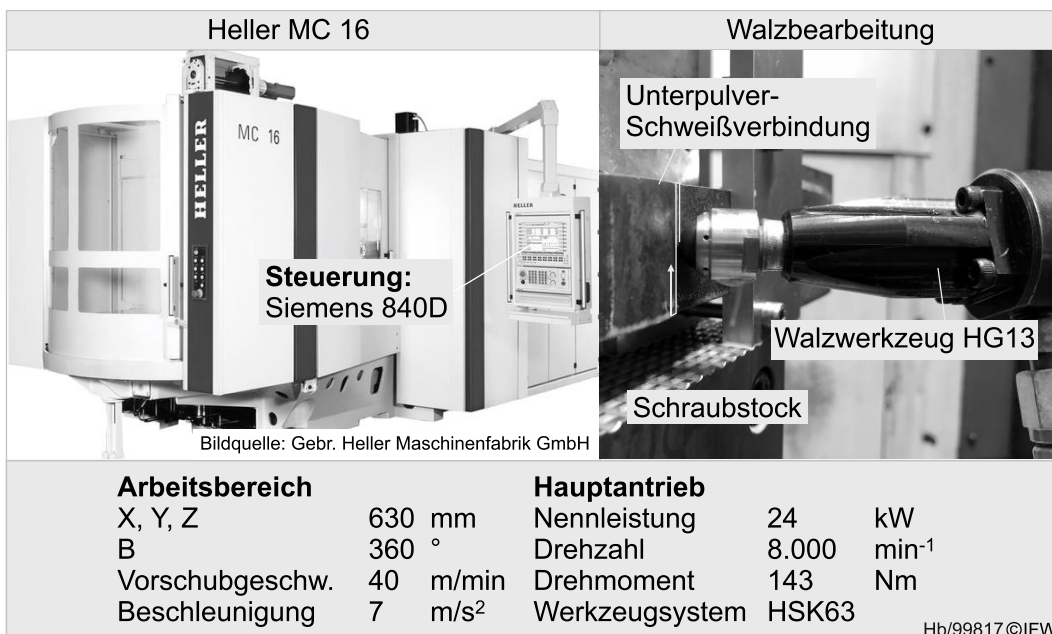
Arbeitsbereich Roboter		PITEC Weld Line 10	
Achsen:	6	Bolzen-Durchmesser:	1,5 2,0 4,0 mm
Reichweite:	1,65 m	Luftdruck:	var.
Traglast:	20 kg	Frequenz:	var.
Pos. wiederholgenauigkeit:	0,04 mm		
Bahnwiederholgenauigkeit:	0,13 mm		

Hb/99817c©IFW

Abbildung 2: Automatisierte HFMI-Bearbeitung am Fraunhofer IGP Rostock

Zum Vergleich mit der manuellen Anwendung wurden Proben bei der Fa. HiFiT bearbeitet. Das HiFiT-Gerät vom Typ HFM wurde ebenfalls mit einem Luftdruck von 7 bar und der Intensitätsstufe 2 betrieben. Durch die andere Wirkweise gegenüber dem PITEC-Gerät resultiert bei diesen Einstellungen eine Frequenz des Pins von $f_{Pin} = 200$ Hz. Für die Anwendung wurde ein Pin mit einem Durchmesser von $d_{Pin} = 3$ mm verwendet. Die Serie wird nachfolgend als HiFiT3 bezeichnet.

Die experimentellen Festwalzuntersuchungen wurden auf dem 4-Achs-Horizontalbearbeitungszentrum MC 16 der Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH durchgeführt. Das Bearbeitungszentrum verfügt über drei Verfahrachsen und einen Rundtisch. Die Kenndaten der Maschine können Abbildung 3 entnommen werden.



Arbeitsbereich		Hauptantrieb	
X, Y, Z	630 mm	Nennleistung	24 kW
B	360 °	Drehzahl	8.000 min ⁻¹
Vorschubgeschw.	40 m/min	Drehmoment	143 Nm
Beschleunigung	7 m/s ²	Werkzeugsystem	HSK63

Hb/99817c©IFW

Abbildung 3: 4-Achs-Bearbeitungszentrum Heller MC16

Eine Bearbeitung der Proben erfolgte in mäanderförmigen Verfahrensbewegungen. Zur Festwalzbearbeitung der Prüfkörper wurde das hydrostatisch gelagerte Werkzeug HG13 des Herstellers ECOROLL AG Werkzeugtechnik verwendet. Die Lagerung der Walzkugel im Nachführsystem ermöglicht einen fortwährenden Kontakt der Walzkugel mit der Werkstückoberfläche durch einen hydraulischen Teleskopmechanismus, der einen Hub H der Walzkugel zulässt. Durch den Mechanismus ist die Festwalzkraft lediglich abhängig von dem eingestellten Betriebsdruck und unabhängig von der bearbeiteten Werkstückkontur. Die mittels des Werkzeugs HG13 nachbehandelten Probekörper werden im Folgenden der Serie DR13 (deep rolling) zugeordnet.

Charakterisierung der Geometrie-, Oberflächen- und Randzoneneigenschaften

Zur Charakterisierung der Geometrie-, Oberflächen- und Randzoneneigenschaften der unbehandelten sowie nachbehandelten Zustände wurden verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Für die Ergebnisse der Rauheitsmessungen sowie Schlibfbilder und Härtemessungen wird auf den Abschlussbericht verwiesen [3].

Der oberflächennahe Eigenspannungszustand wurde mittels winkeldispersiver Röntgendiffraktometrie (Strahlung: $\text{CrK}\alpha$, Netzebene α -Eisen: 211, max. Informationstiefe $\tau_{\text{max}} = 5 \mu\text{m}$, Auswertung nach $\sin^2\psi$ -Methode) bestimmt. Die für die Blechdicken $t = 20 \text{ mm}$ und $t = 40 \text{ mm}$ aus S460ML gemessenen Eigenspannungswerte sind in Abbildung 4 dargestellt. Die im geschweißten Zustand gemessenen oberflächennahen Eigenspannungen der verschiedenen Proben betragen im Mittel zwischen -200 und -400 MPa längs \parallel und quer \perp zur Schweißrichtung, wobei die Streuung vergleichsweise niedrig ist. Ursächlich für die bereits initial vorliegenden Druckeigenspannungszustände ist das mechanische Bürsten, das zur Entfernung von Schlackereesten in den Nahtübergängen der Proben notwendig war.

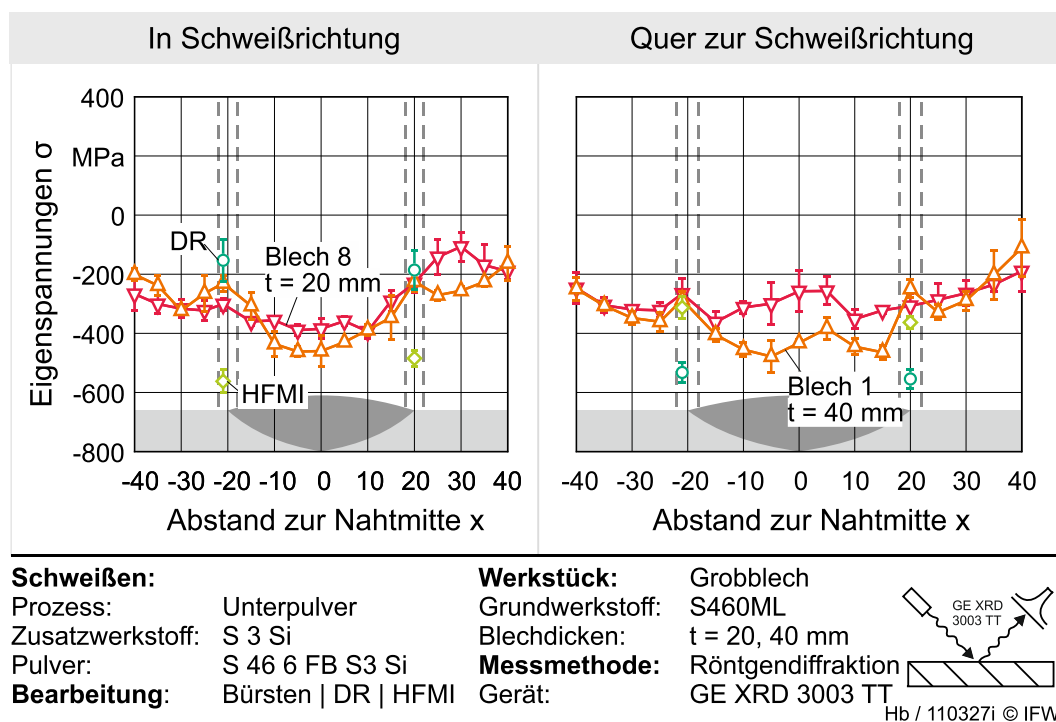


Abbildung 4: Oberflächennahe Eigenspannungen der Proben des Grundwerkstoffs S460ML. Die mechanischen Bearbeitungsverfahren beeinflussen den initialen Druckeigenspannungszustand. In Schweißrichtung erzeugt der Festwalzprozess (DR) Druckeigenspannungen in Höhe

von -200 MPa, wobei quer zur Schweißrichtung Druckeigenstressungen mit einem Betrag von -550 MPa erzeugt werden. Das Höherfrequente Hämmern (HFMI) zeigt ein gegenläufiges Ergebnis: Die Eigenstressungen in Schweißrichtung sind mit -500 bis -550 MPa betragsmäßig größer als die Eigenstressungen quer zur Schweißrichtung (-300 bis -350 MPa). Dies ist in den verschiedenen Haupt-Umformrichtungen der beiden Verfahren begründet. Während das Festwalzen durch die mäanderförmige Prozesskinematik den Werkstoff quer zur Schweißrichtung vor sich herschiebt, ist beim Höherfrequenten Hämmern durch die Applikation entlang des Nahtübergangs das Gegenteil der Fall.

Der Einfluss des Festwalzens auf die tiefenaufgelösten Eigenstressungen (gemessen per Röntgendiffraktometrie mit elektrolytischem Polieren sowie der DMS-Bohrlochmethode) ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine tiefenaufgelöste Messung der durch das Höherfrequente Hämmern erzeugten Eigenstressungen war aufgrund der lokalen Wirkung im Nahtübergang mit den verfügbaren Messmethoden nicht möglich. Die oben angeführten Erläuterungen bzgl. der richtungsabhängigen Entstehung der Eigenstressungen werden auch in den tiefenaufgelösten Messungen bestätigt.

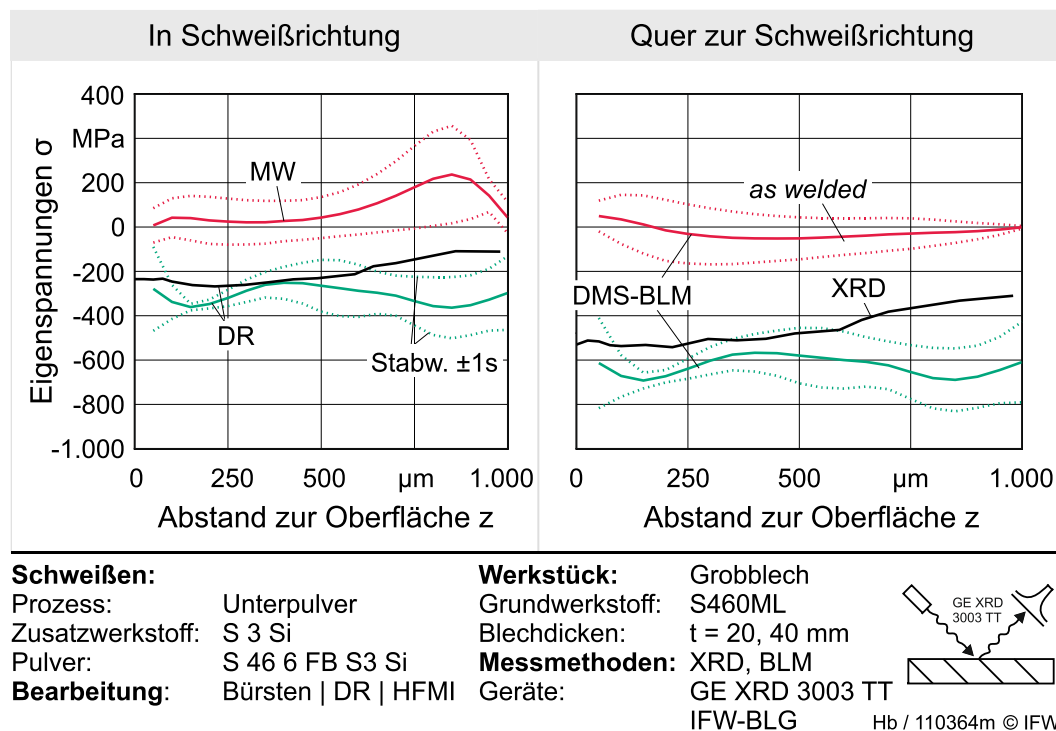


Abbildung 5: Eigenspannungstiefenverläufe festgewalzter Proben des Grundwerkstoffs S460ML

Für den Werkstoff S690QL1 wurden ähnliche Wirkungen des Bürstens und der mechanischen Bearbeitungsverfahren bestimmt, sodass hierfür auf den Abschlussbericht verwiesen wird [3].

Mit Hilfe von 3D-Geometrien bzw. Topografien wird zunächst die Beeinflussung der Nahtgeometrien durch die Nachbehandlungsmethoden qualitativ betrachtet, siehe Abbildung 6 für den Werkstoff S460ML. Im Zustand AW ist im Bereich der Wärmeeinflusszone die grobe Nahtvorbereitung zu erkennen. Das Festwalzen mit dem Werkzeug HG13 erzeugt eine ausgeprägte Umformung des Nahtübergangs, wobei abhängig vom initialen Nahtanstiegswinkel (θ_{AW}) un-

verschiedene Nahtgeometrien entstehen können. Rauheiten der Nahtvorbereitung werden vollständig eingelätet. Das automatisierte Höherfrequente Hämmern erzeugt eine lokale Umformung der Nahtgeometrie, die Abbildung des Pins im Werkstoff ist klar zu erkennen.

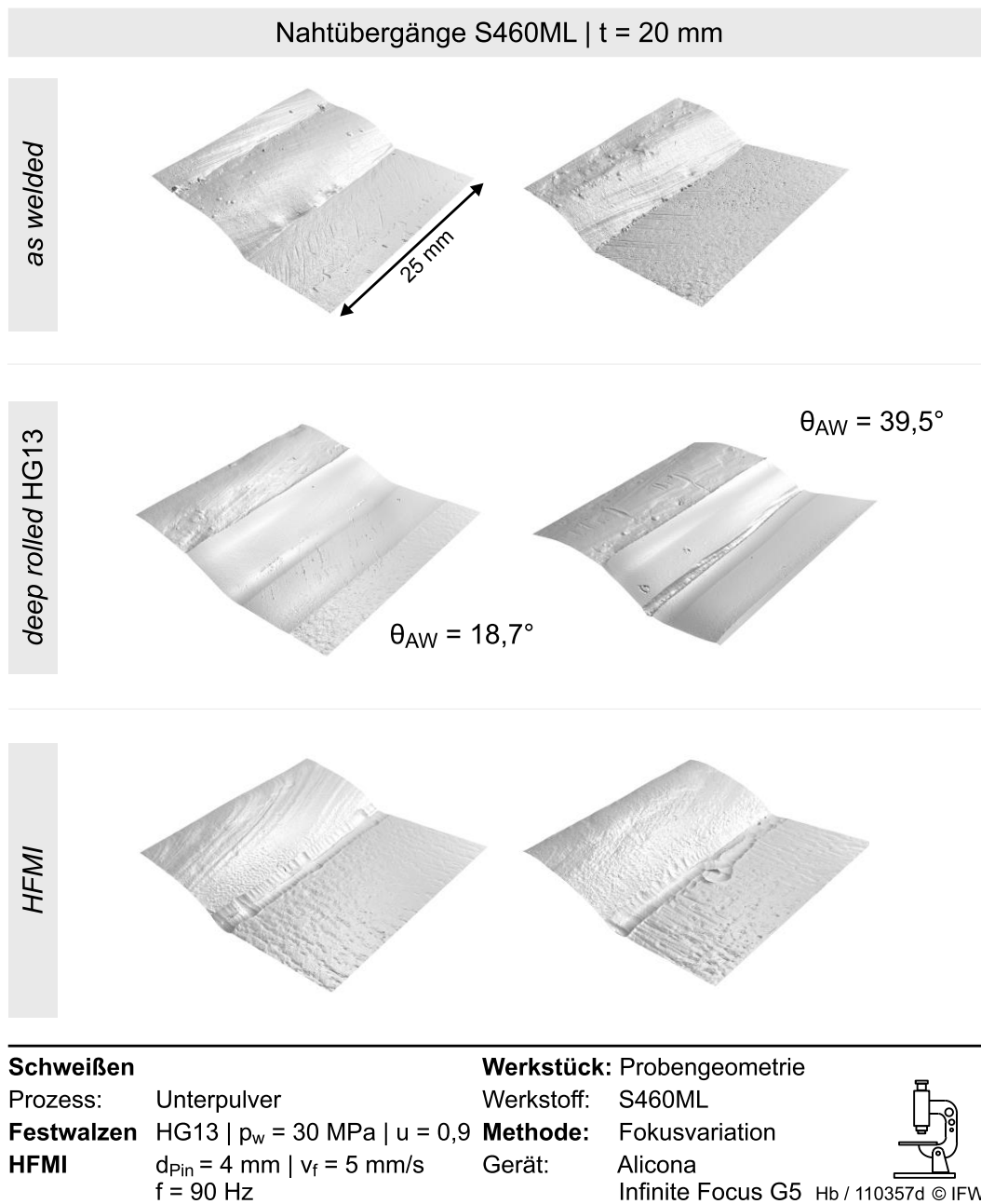


Abbildung 6: 3D-Aufnahmen der Nahtgeometrien für den Werkstoff S460ML

Die 3D-Geometrien bzw. Topografien der bearbeiteten Schweißverbindungen des Werkstoffs S690QL1 zeigen ein ähnliches Bild, siehe Abbildung 7. Aufgrund der höheren Festigkeit ist die Bildung der schärferen Kerbe infolge des Festwalzprozesses bereits für niedrigere initiale Nahtanstiegswinkel beobachtet worden. Die Kugel wird während des Prozesses stärker abgestützt. Für das automatisierte HFMI wurde beobachtet, dass dem Nahtübergang teilweise nicht gefolgt werden konnte.

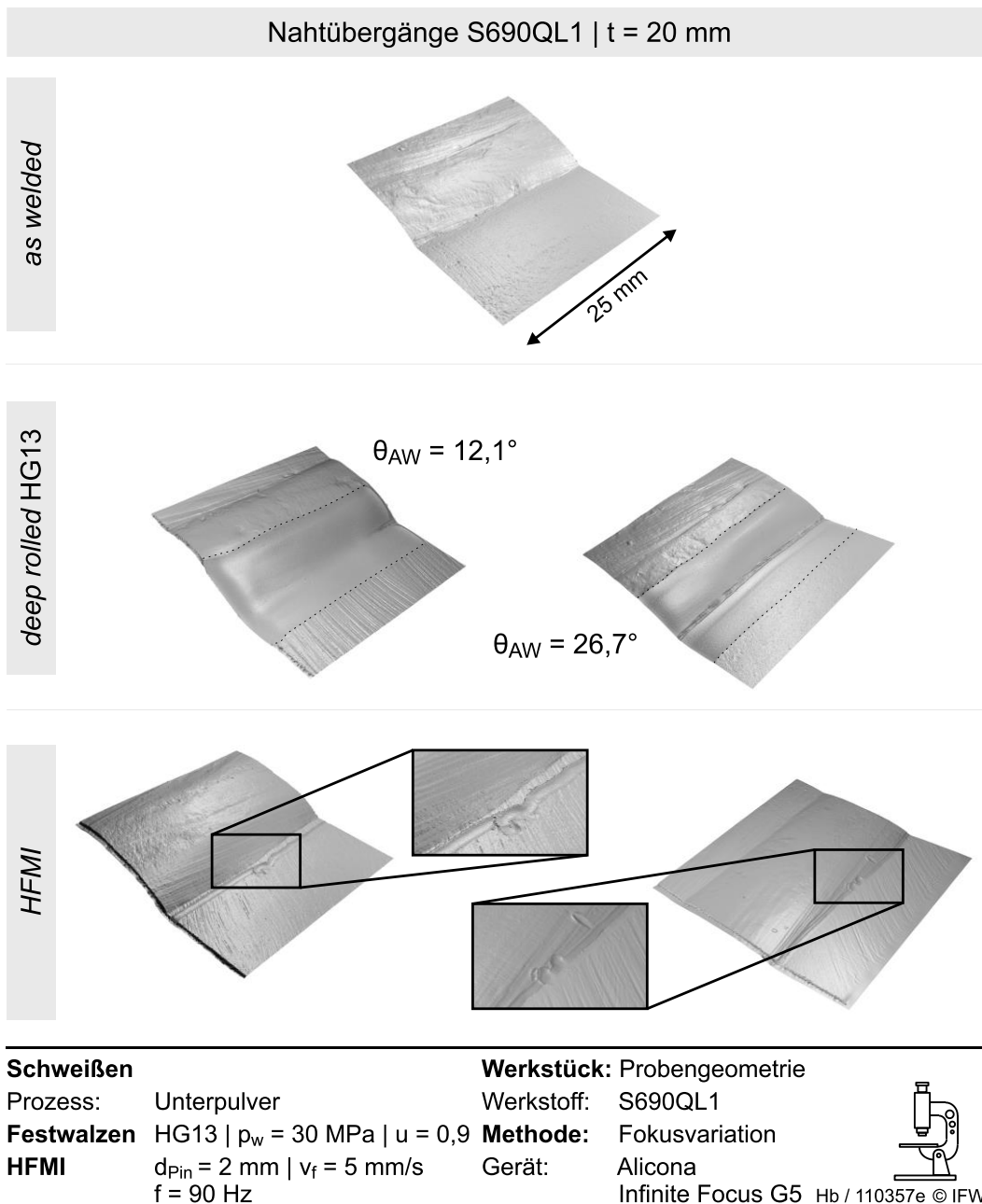


Abbildung 7: 3D-Aufnahmen der Nahtgeometrien für den Werkstoff S690QL1

Um den Einfluss der Nachbehandlungsmethoden auf die Schweißnahtgeometrie zu quantifizieren, wurden die Schweißnahtparameter Kerbradius und Nahtanstiegswinkel vor und nach der Schweißnahtnachbehandlung bestimmt. Hierfür wurden die Schweißnähte der Schwingproben mit Hilfe eines Laserliniensensors Keyence LJ-V 7080 automatisiert in einer CNC-Werkzeugmaschine gescannt. Anschließend wurden der Kerbradius r und der Nahtanstiegswinkel θ mit einem in MATLAB implementierten Algorithmus bestimmt. Die linear-elastischen Kerbfaktoren wurden mit ANSYS Mechanical APDL ermittelt, siehe [3]. Neben den in diesem Projekt untersuchten Werkstoffen S460ML und S690QL1 werden nachfolgend auch die Ergebnisse des Vorgängerprojekts P1389 „Deep Rolled Welds“ [4] mit dem Werkstoff S355MLO herangezogen.

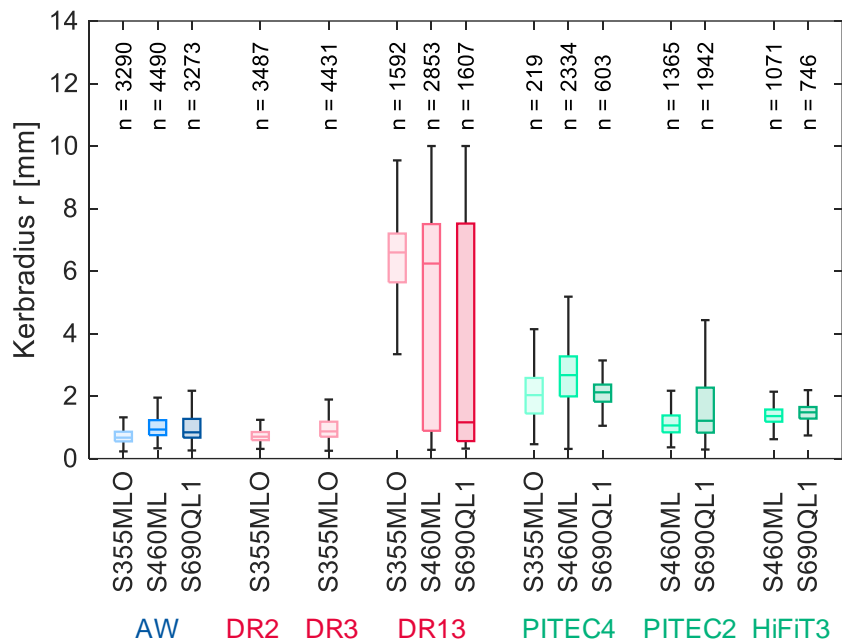


Abbildung 8: Box-Plots zum Vergleich der Verteilungen der Kerbradien für die unterschiedlichen Werkstoffe und Zustände

In Abbildung 8 sind die Verteilungen der Kerbradien für die unterschiedlichen Serien dargestellt, um den Einfluss der Nachbehandlungsmethoden in Abhängigkeit von der Werkstoffgüte zu untersuchen. Die AW-Proben weisen für die verschiedenen Werkstoffe vergleichbare Kerbradien auf. Die Werkstoffe S460ML und S690QL1 weisen jedoch leicht größere Werte auf sowie eine Zunahme der Streuung. Der Einfluss unterschiedlicher Festwalzwerkzeuge und entsprechend der Kugeldurchmesser wurde im Vorgängerprojekt am Werkstoff S355MLO untersucht und ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Ein zunehmender Kugeldurchmesser bewirkt eine größere plastische Umformung und damit eine Ausrundung des Nahtübergangs, so dass größere Kerbradien quantifiziert werden können. Dieselben Prozessstellgrößen der Serie DR13 wurden auf die Stumpfnähte aus den Werkstoffen S460ML und S690QL1 angewendet. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Streckgrenze geringere Kerbradien ermittelt werden und die Streuung signifikant zunimmt. In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass dies von dem initialen Nahtanstiegswinkel beeinflusst wird. In [XX] ist der Einfluss des Nahtanstiegswinkels genauer betrachtet worden. Es konnte gezeigt werden, dass beim Festwalzen mit zunehmender Streckgrenze und zunehmendem Nahtanstiegswinkel, eine unvollständige Bearbeitung des Nahtübergangs auftritt. Die mittels HFMI nachbehandelten Proben weisen Mittelwerte der Kerbradien auf, die in etwa den Pinradien bzw. halben Pindurchmessern entsprechen. Bei der Serie HiFiT3 wurden die Proben manuell bearbeitet und zeigen sehr kleine Streuungen und keine Unterschiede zwischen den Werkstoffen S460ML und S690QL. Dagegen haben die Serien PITEC2 und PITEC2 größere Streuungen und unterschiedliche Verteilungen für die unterschiedlichen Werkstoffe. Die Bearbeitung erfolgte hierbei mittels Roboter. Wie in Abbildung 7 zu erkennen, konnte die automatisierte HFMI-Nachbehandlung dem Nahtübergang teilweise nicht folgen. Daher werden die Unterschiede zwischen den HFMI Serien auf die noch nicht optimierte Roboterführung zurückgeführt und weniger auf den Hersteller des höherfrequenten Hammers.

In Abbildung 9 sind die Verteilungen der Kerbfaktoren dargestellt. Für die Serien PITEC4 mit dem Werkstoff S690QL1 sowie HiFiT wurden keine Schwingproben bearbeitet, sondern nur die beim Wasserstrahlschnitt verbleibenden Stege zwischen den Proben. Da diese einen großen Verzug aufwiesen, wurden die Scandaten nicht für ANSYS-Rechnungen herangezogen, da die sekundären Spannungen die Kerbformzahlen verfälscht hätten. Es ist zu erkennen, dass die Proben im AW-Zustand aus dem Werkstoff S690QL1 größer streuen im Vergleich zu den anderen Werkstoffen. Als Folge der niedrigeren Nahtanstiegswinkel zeigen zudem die Proben aus dem S460ML und S690QL1 gegenüber dem Werkstoff S355MLO geringere Kerbfaktoren auf. Die Erkenntnisse, die sich aus den Verteilungen der Kerbfaktoren ableiten lassen, entsprechen überwiegend den Erkenntnissen aus den Kerbradien. Bei den mittels HFMI nachbehandelten Schweißnahtübergängen ist kein Werkstoffeinfluss erkennbar, da die Daten für unterschiedliche Werkstoffe lediglich geringfügige Abweichungen bei den Mittelwerten aufweisen. Dabei lassen sich größere Streuungen auf die Unterschiede im unbehandelten Zustand zurückführen. Dagegen lässt sich beim Festwalzen ein Einfluss der Stahlgüte erkennen, sodass mit steigender Streckgrenze keine Verbesserung der Nahtgeometrie auf Basis der Verteilungen festgestellt werden kann.

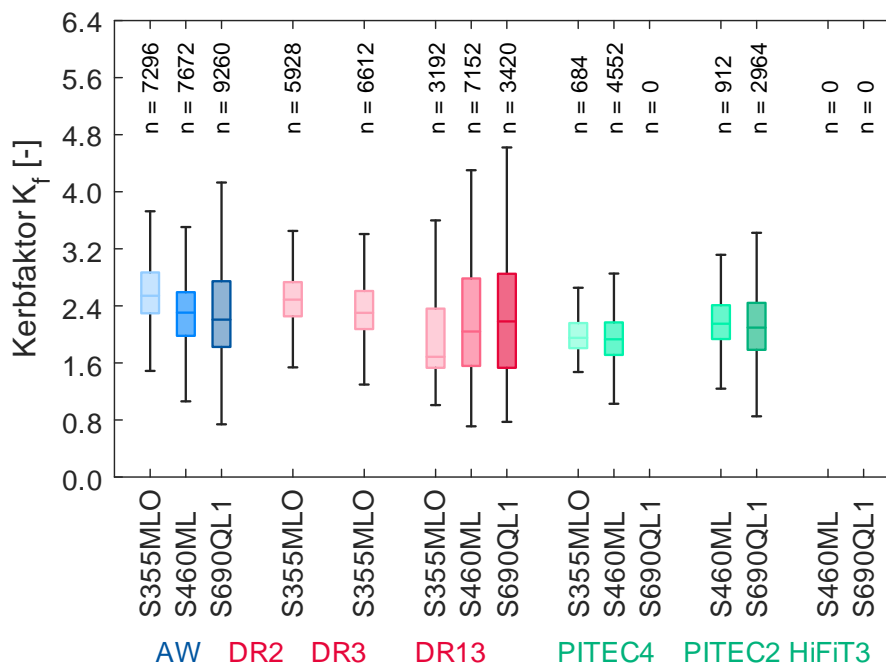


Abbildung 9: Box-Plots zum Vergleich der Verteilungen der Kerbfaktoren für die unterschiedlichen Werkstoffe und Zustände

Ermüdungsfestigkeit

Der Einfluss der Nachbehandlungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit wurde mit Hilfe von Wöhlerversuchen im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich untersucht. Die Durchführung der Wöhlerversuche im Zeitfestigkeitsbereich erfolgte in einer servohydraulischen Universalprüfmaschine HUS 60 des Herstellers MFL Prüf- und Messsysteme GmbH mit einer Prüffrequenz zwischen 3 und 10 Hz. Die Versuche im Dauerfestigkeitsbereich wurden in einem Magnetresonanzprüfrahmen bei einer Prüffrequenz von ca. 200 Hz durchgeführt [6].

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse aller Ermüdungsversuche für die Blechdicke $t = 20$ mm dargestellt. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Werkstoffe können durch die Farbintensität unterschieden werden.

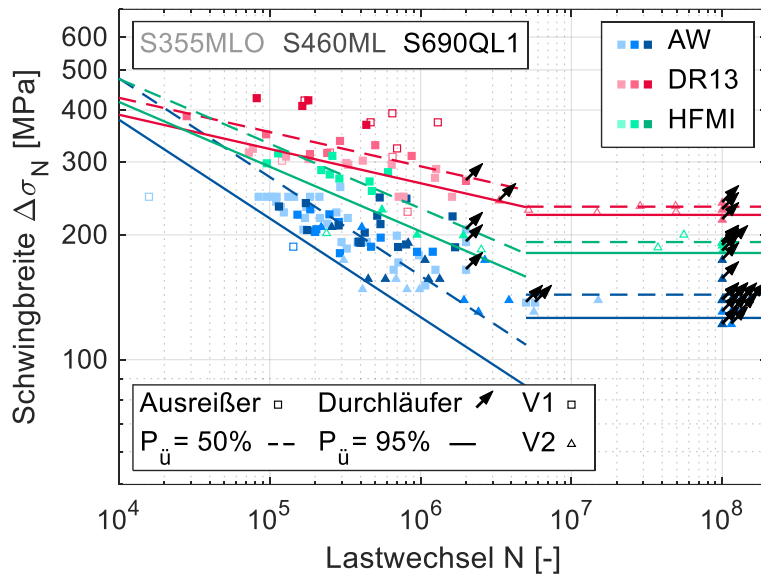


Abbildung 10: Ergebnisse aller Wöhlerversuche im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich

Es ist zunächst zu erkennen, dass die Ergebnisse der Ermüdungsversuche für den AW-Zustand bei allen Werkstoffen im gleichen Streubereich liegen, sodass eine gemeinsame Wöhlerkurve ermittelt wurde: $\Delta\sigma_{c,50\%} = 135,4$ MPa, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 107,4$ MPa, $m = 4,2$.

Bei den festgewalzten Proben ist ein Einfluss der Streckgrenze zu erkennen: Mit zunehmender Streckgrenze, steigt die Ermüdungsfestigkeit an. Bei den vorherigen Untersuchungen konnte ein negativer Einfluss der Stahlgüte auf die Nahtgeometrie nach der Nachbehandlung festgestellt werden. Dies hatte jedoch keinen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit in den Versuchsserien, sodass die Steigerung der Ermüdungslebensdauer auf die eingebrachten Druckeigenspannungen sowie möglicher Randschichtverfestigungen zurückzuführen ist. Eine gemeinsame Auswertung aller festgewalzten Proben würde zu einer zu großen Streuung führen, sodass die Ermüdungsfestigkeitskurven basierend auf dem S460ML dargestellt wurden, mit $\Delta\sigma_{c,50\%} = 276,4$ MPa, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 251,6$ MPa, $m = 12,1$. Der Abknickpunkt der Wöhlerkurven als Übergang vom Zeit- zum Dauerfestigkeitsbereich wurde zu 5 Mio. Lastwechsel angenommen. Die ermittelten Dauerfestigkeiten sind $\Delta\sigma_{L,50\%} = 233,9$ MPa, $\Delta\sigma_{L,95\%} = 223,5$ MPa.

Gegenüber dem AW-Zustand konnte auch beim höherfrequenten Hämmern eine signifikante Steigerung der Ermüdungslebensdauer erzielt werden. Die dargestellten Wöhlerlinien haben die Kennwerte $\Delta\sigma_{c,50\%} = 207,8$ MPa, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 282,9$ MPa, $m = 6,4$.

Es ist zudem zu erkennen, dass für die Zustände HFMI und DR13 die Ermüdungsfestigkeiten im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich zusammenpassen und der Einfluss aus der unterschiedlichen Prüftechnik gering ist. Die Ergebnisse im Zustand AW zeigen, dass der Abknickpunkt einer gemeinsamen Wöhlerkurve bei ca. 1 Mio. Lastwechseln angenommen werden kann.

Nach DIN EN ISO 1993-1-9 [5] sowie vergleichbaren Normen bzw. Richtlinien ist die ange-setzte Ermüdungsfestigkeit bei Blechdicken über 25 mm abzumindern. Um den Einfluss der

Blechdicke zu untersuchen, wurden für dem Grundwerkstoff S460ML Ermüdungsversuche an mehrlagig UP-geschweißten Proben mit Blechdicken von 40 und 60 mm durchgeführt. In Abbildung 11 sind die Ermüdungsergebnisse in Abhängigkeit der Blechdicke dargestellt. Hierfür wurden die Spannungsschwingbreiten mit Hilfe der Wöhlerliniengleichung zur Referenzlastwechselzahl $N = 2$ Mio. transferiert. Für den unbehandelten Zustand lässt sich kein Einfluss der Blechdicke ableiten. Die Ergebnisse der festgewalzten Proben übersteigen zudem signifikant die Ermüdungsfestigkeiten der unbehandelten Proben. Allerdings lässt sich für die nachbehandelten Serien eine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit mit steigender Blechdicke ablesen. Anzumerken ist, dass die Probekörper mit den größeren Blechdicken größere Imperfektionen aufwiesen. Die Spannungsschwingbreiten wurden unter Verwendung der quantifizierten Imperfektionen korrigiert, siehe [3]. Die verwendeten Formeln basieren auf Modellannahmen. Daher ist es möglich, dass die Ergebnisse in Abbildung 11 weiterhin einen Einfluss der Schweißnahtimperfektionen zeigen und nicht ausschließlich den Blechdickeneinfluss.

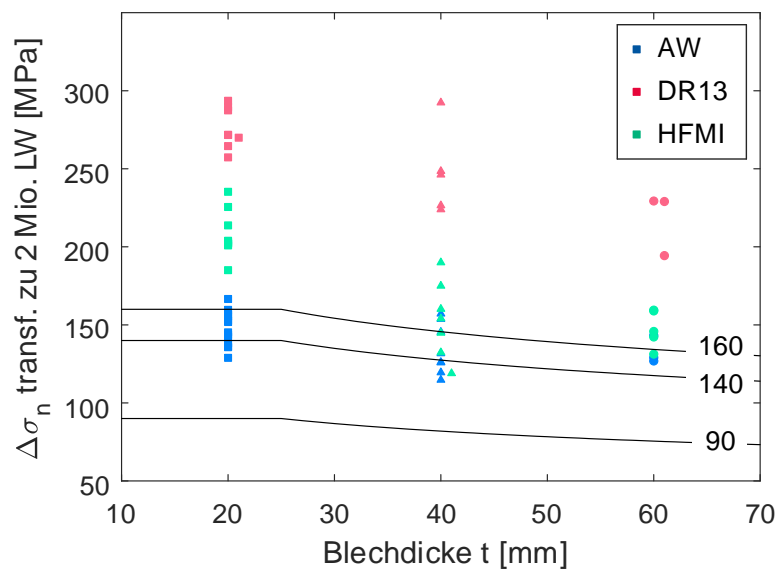


Abbildung 11: Ergebnisse der Wöhlerversuche in Abhängigkeit der Blechdicke durch Transferieren der Spannungsschwingbreiten zur Referenzlastwechselzahl $N = 2$ Mio.

Zusammenfassung und zukünftige Forschungsarbeiten

Ziel der Untersuchungen war die Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen hochfester Feinkornbaustähle infolge der automatisierten Nachbehandlungsverfahren Festwalzen und höherfrequentes Hämmern zu quantifizieren und einen damit einen Einsatz dieser Stähle für Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen zu ermöglichen.

Die Untersuchungen wurden an den Werkstoffen S460ML und S690QL1 durchgeführt. Für das Festwalzen wurde eine Werkzeugmaschine am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover verwendet, während das automatisierte Hämmern beim Fraunhofer IGP mittels eines Roboters erfolgte. Für die Nachbehandlungsmethoden konnten die Druckeigenspannungen und Randschichtverfestigungen reproduzierbar umgesetzt werden. Mit Hilfe hochauflösender dreidimensionaler Aufnahmen des Schweißnahtübergangs sowie der Digitalisierung der Schweißnahtgeometrie mittels Laserliniensensor, wurde die lokale Nahtgeometrie für die verschiedenen Prozesse und Werkstoffe charakterisiert. Beim Festwal-

zen konnte mit zunehmender Streckgrenze eine fehlende Beeinflussung der Geometrie festgestellt werden. Beim höherfrequenten Hämmern zeigte sich hingegen eine Abhängigkeit vom Pindurchmesser. Der Kerbradius entspricht nach der Bearbeitung für alle Werkstoffe in etwa dem halben Pindurchmesser. Zudem konnte für das höherfrequente Hämmern eine Reduzierung des Kerbfaktors dargestellt werden.

Die Ermüdungsuntersuchungen zeigten, dass die Nachbehandlungsmethoden die Ermüdungslebensdauer erheblich verlängern und die Dauerfestigkeit steigern können. Beim Festwalzen war die Verbesserung trotz geringerer Nahtbeeinflussung größer, als beim höherfrequenten Hämmern. Zudem stieg die Ermüdungsfestigkeit mit der Streckgrenze. Die Automatisierung der Nachbehandlungsprozesse zeigt sich als Möglichkeit, die Ermüdungsfestigkeit von UP-Schweißverbindungen auf sichere Weise zu steigern. Beide Verfahren eignen sich für große Strukturen wie Monopiles und bieten Potenzial zur erheblichen Reduzierung des Stahlgewichts.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die automatisierte Nachbehandlung in einem Pilotprojekt im industrienahen Umfeld testen, um zusätzliche Erkenntnisse zur anwendungssicheren Qualität zu gewinnen. Um die Anwendung der Verfahren und den Einsatz hochfester Feinkornbaustähle zu gewährleisten, müssen die Ergebnisse langfristig in Regelwerke integriert oder zur Zertifizierung der Nachbehandlungsverfahren für den Einsatz an Monopiles und Türmen von Offshore-Windenergieanlagen genutzt werden.

Förderhinweis

Das Projekt "Ermüdungsfestigkeit von Stumpfnahstößen hochfester Offshore—Feinkornbaustähle mit und ohne Nachbehandlung für den Bau von Offshore-Windenergieanlagen" wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dieses IGF-Vorhaben 21496 N/ P 1506 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde an der Leibniz Universität Hannover durch das Institut für Stahlbau sowie dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen durchgeführt. Die in dem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse sind umfassend im zugehörigen Abschlussbericht dargestellt. Dieser Abschlussbericht ist bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) erhältlich.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Literatur

- [2] *Schaumann, P.; Böhm, M.*: Die geplante Energiewende in Deutschland wird nur mit einem weiteren Ausbau von Offshore Windparks gelingen – Die Ermüdungsfestigkeit der hochbelasteten stählernen Tragstrukturen bedarf dabei spezieller Aufmerksamkeit. *Der Prüflingenieur* 56, S. 36–47, 2020.
- [3] *Schaumann, P.; Dänekas, C.; Breidenstein, B.; Heikebrügge, S.*: P 1506 - Ermüdungsfestigkeit von Stumpfnahstößen hochfester Offshore—Feinkornbaustähle mit und ohne Nachbehandlung für den Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Schlussbericht IGF-Vorhaben 21496 N, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V, Düsseldorf (noch unveröffentlicht).
- [4] *Schaumann, P.; Dänekas, C.; Breidenstein, B.; Heikebrügge, S.*: P 1389 - Erhöhte Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen in der Windenergie durch Festwalzen. Schlussbericht IGF-Vorhaben 20626 N, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V, Düsseldorf, 2022.
- [5] *DIN EN ISO 1993-1-9*: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-9: Ermüdung. Berlin, Beuth Verlag, 2010.
- [6] *Stappeler, S.*: Zum Ermüdungsverhalten von Stumpfnahstößen bei sehr hohen Lastwechselzahlen. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2014.

Autoren dieser Veröffentlichung:

Christian Dänekas, M. Sc.
Institut für Stahlbau, ForWind Hannover, Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A, 30167 Hannover
E-Mail: daenekas@stahl.uni-hannover.de

Steffen Heikebrügge, M. Sc.
cunova GmbH
Klosterstraße 29, 49074 Osnabrück
E-Mail: steffen.heikebruegge@cunova.com
ehemals
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen

Prof. Dr. sc. ETH Elyas Ghafoori
Institut für Stahlbau, ForWind Hannover, Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A, 30167 Hannover
E-Mail: ghafoori@stahl.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Institut für Stahlbau, ForWind Hannover, Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A, 30167 Hannover
E-Mail: schaummann@stahl.uni-hannover.de

Apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Breidenstein
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
E-Mail: breidenstein@ifw.uni-hannover.de